

育林技術

對闊葉樹未成熟材化學組成之影響

◎王秀華／國立屏東科技大學木材工業系教授

林曉洪／國立屏東科技大學木材工業系副教授

陳弘彬／國立屏東科技大學木材工業系學生

摘要

測定栽植於美國中西部，不適農作物生產之邊緣地上的五種三年生闊葉樹，牛奶子(*Elaeagnus umbellata* Thunb.)、黑赤楊(*Alnus glutinosa* L.)、洋槐(*Robinia pseudacacia* L.)、佛羅里達白楊(*Populus deltoides* Bartr.)和美國梧桐(*Platanus occidentalis* L.)之木質素、五碳糖、全纖維素和 α -纖維素含量。並了解樹種、立地、栽植間距和取材部位等因素對木材化學組成之影響。生長在較高立地的林木，明顯有較多的木質素、五碳糖和全纖維素含量。栽植間距較窄時，林木的五碳糖含量較高；栽植間距較寬則木質素、全纖維素和 α -纖維素含量較高。全為木材部分者，含有較多量的五碳糖、全纖維素和 α -纖維素；而含有樹皮、枝梢材及莖幹材之混合試材，則含較多的木質素。牛奶子之木質素含量最高。美國梧桐則有較多的五碳糖和全纖維素。洋槐的 α -纖維素含量最多。換言之，此五種闊葉樹未成熟材，既可作為人造纖維和聚合工業的原料，又可供液態燃料之用。

關鍵字：未成熟材、纖維素、木質素、五碳糖、造林地。

壹、緒言

近年來，北美洲纖維來源短缺的問題，日益嚴重，無論在製板、造紙或有機化學藥劑的提煉上，都普遍出現原料不足的情況。因此，尋求高收穫量、短輪伐期的落葉性生物質量，作為上述產品的新原料，正其時也。而未成熟材作為合成有機化學藥劑之原料，具有極大的潛力。設若原料之永續供應無虞，就可以合理的成本，簡單的化學流程，將木質材料轉變為聚合物與有機藥劑。大量的落葉性闊葉造林木，即可提供化學工業足夠的原料⁽²⁾。以短

輪伐期集約栽植(short-rotation intensive culture簡稱SRIC)所得之生物質量產製化學藥劑之成功與否，端視林地生產力及該生物質量之基本性質而定⁽³⁾。雜交白楊木之種源、組織和年齡，對化學反應參數和化藥之收量也有所影響。木材和農作廢棄物，因其處理時耗能低及可再生性，向被視為「工程材料」(engineering material)。生物質量將是有機化藥之重要供給來源⁽⁴⁾。將生物質量轉換成聚合材料、化學藥品和燃料，對國家的經建發展必然有所貢獻⁽⁵⁾。彼等尚可以生產生物性原料和各種使

合產品⁽⁶⁾。

至於利用此種生質量之經濟性若何，吾人評估其供給系統之總成本後發現，雜交白楊木人造林所提供的生質量，無法與天然林之木材相比擬⁽⁷⁾。部分原因來自於土地成本較高。將生質量轉換成各種有用化學藥品與燃料的可行性，早已有之⁽⁸⁾。惟應用大規模的生質量，產製化學藥品與燃料之成功與否，決定因素在於石化燃料之價格與可使用期限。有朝一日，此等資源會因產量日萎而導致價格上漲，屆時可再生的天然纖維原料，將更具經濟上的吸引力而備受矚目。

下列有機化學藥與燃料，皆可自木質生物量中之五碳糖、纖維素和木質素轉換而得：

1. 戊糖（五碳糖）經：

- 發酵作用可得：酵母（可用於製造維他命、蛋白質和脂肪）
- 脫水作用可得：糠醛（可用於製造塑膠）
- 氫化作用可得：多醇類（可作為化學溶媒和中間產物）
- 結晶作用可得：木糖（以製造糠醛）

2. 纖維素和己糖（六碳糖）經：

- 發酵作用可得：醇類（乙醇、丁醇、異丙醇）；多醇類（甘油、乙二醇、可做防凍劑、丙二醇）；酮類（丙酮可以製作炸藥，指甲油去光水和許多其他的產品），酸類（醋酸、乳酸、酪酸（butyric acid））
- 脫水和水解作用可得：羥甲基糠醛（hydroxymethylfurfural）、果糖酸（levulinic acid）（一種中間產物）
- 氫化作用可得：甘油和其他醇類

- 結晶作用可得：葡萄糖（製造醇類；也是人類所需之養分）

3. 木質素經：

- 水解作用可得：酚類混合物（以製造膠合劑）
- 氫化作用可得：苯和其它芳香族化合物（可生產溶媒、染劑和其它有機化合物）
- 氫化作用可得：甲酚醌類（以生產羥苯乙酮（hydroxyacetophenones））

其它可由木材之生質量獲得之合成纖維和聚合物，包括：來自糠醛的尼龍；從 α -纖維素中得到的人造絲和軟片；由木質素中提煉出來的香草精和膠合劑⁽²⁾。木材之化學組成隨樹種、樹齡、取材部位而呈多樣變化⁽⁹⁻¹²⁾。因之而左右林木之用途。因此，進行短輪伐期林木栽植時，需先瞭解樹種之化學特性，以期生產化學藥品時能有較高產量。

曾有研究指出⁽¹³⁾，牛奶子、黑赤楊、洋槐、佛羅里達白楊和美國梧桐是極佳的化學藥品生產樹種。因此，育林技術對林木化學組成之影響，就有必要詳加探究。是故，本研究之主要目的，在探討不同育林條件對五種短輪伐期三年生闊葉樹材之木質素、全纖維素、 α -纖維素和五碳糖含量之影響。並就樹種、取材部位、栽植距離和栽植立地四方面，探討影響未成熟材化學特性之因素。

貳、試驗材料、試驗設計及測試方法

試驗材料及備樣

自美國伊利諾州南部狄克遜溫泉農業中心（Dixon Springs Agriculture Center）之三年生人

工造林地伐採樣株後，依樹種、栽植立地和栽植間距之不同分別集結成捆以便取樣。立地條件分高地和低地兩種，栽植間距較寬者為30.5 × 45.7cm，較窄者為23 × 23cm。且記錄每捆試材之重量。並將莖幹上枝條材切下秤重，以決定枝條與莖幹材之比例。

從每一捆材中，逢機取得部分幹材，將其基部、中段、頂部各數段剝皮，作為木質（部分）試材，再切成小圓盤置於磨粉機中，磨成木粉，選取通過60篩網(250 μm)的部分作為本研究之試樣。至於幹材之混合試樣，亦是逢機切取基部、中段、頂部之數段磨粉後，取通過60篩網者，再將任意取得之枝條磨成粉，依比例混於幹材木粉中。

試驗設計

試驗之進行以逢機完全區集法(RCB)利用因素分析，來決定育林技術之組合對木材化學組成份之影響。本試驗之獨立變因為：木質素、五碳醣、全纖維素及α-纖維素含量；處理組之依變數為立地（因素A）、栽植間距（因素B）、取材部位（因素C）和樹種（因素D），其中立地分為：

A1 = 低地

A2 = 高地

栽植間距區分：

B1 = 窄距(23 × 23cm)

B2 = 寬距(30.5 × 45.7cm)

取材部位亦分：

C1 = 混合樹皮、樹枝和幹材

C2 = 純木材

樹種又分：

D1 = 牛奶子

D2 = 黑赤楊

D3 = 洋槐

D4 = 佛羅里達白楊

D5 = 美國梧桐

因此，對每一依變數而言，逢機完全區集之分析(RCB)共有 $2 \times 2 \times 2 \times 5$ 因數。

以下列RCB線性模式加以說明RCB變異之起源：

$$Y_{ijklm} = \mu + R_i + A_j + B_k + AB_{jk} + C_l + AC_{jl} + BC_{kl} + ABC_{jkl} + D_m + AD_{jm} + BD_{km} + CD_{lm} + ABD_{jlm} + ACD_{jlm} + BCD_{klm} + ABCD_{jklm} + \epsilon_{ijklm}$$

式中，

Y_{ijklm} = 任一化學性質之觀測值 (any observed value for a chemical property)

μ = 總平均值 (overall mean)

R_i = 區集效應（重複數）(block effect (replication))

A_j = 立地效應 (site effect)

B_k = 栽植間距效應 (spacing effect)

C_l = 取材效應 (wood portion)

D_m = 樹種效應 (species effect)

ϵ_{ijklm} = 試驗機差 (experimental error)

而

i = 重複1-6次

j = 兩種立地條件 (A)

k = 兩種栽植間距 (B)

l = 兩種試材 (C)

m = 五種樹材 (D)

上列各種文字代號之組合，表示各依變數之交互作用。

分析工作以統計分析系統 (Statistical Analysis System 簡稱 SAS)⁽¹⁴⁾ 中之線性模式電腦軟體加以運算, 分析項目包括因素分析之一般線性模式、平均數間多元比較之鄧肯氏變域試驗 (Duncan's Multiple Range) 及最小顯著差異 (least significant difference 簡稱 LSD), 進行兩兩間 t -分配多元比較。

試驗方法

試驗工作依據美國試驗暨材料學會 (ASTM) 之 D1103, D1104, 及 D1106⁽¹⁵⁾ 和漿紙工業協會 (TAPPI) 之標準⁽¹⁶⁾ 進行。本研究每一依變數之組合, 皆重複六次試驗。

參、結果與討論

施行不同育林技術, 對各試材幹材比重之影響, 除黑赤楊與美國梧桐略有趨勢, 即窄距、低地者之比重略高於寬距高地者外, 其餘三種未呈系統性變化。連皮幹材則僅美國梧桐有上述趨勢。

1. 不同處理試材之比重及含水率 (表 1)

2. 木質素含量

所謂木質素是木材中萃取物先行分離移除後, 使多醣類完全水解, 所得不溶的殘渣。北美闊葉樹材之木質素含量, 約在 17~25%⁽¹⁷⁾ 之譜。李氏⁽¹³⁾ 測試本研究樹種之商品用材, 得平均木質素含量約 24%。且與樹齡無關, 而受取材部位之影響。此外, 樹皮之木質素含量較木材部分多 6%。

各種依變數之組合下所得試材之木質素含量列於表 2, 其中, 洋槐、美國梧桐、黑赤楊、牛奶子及佛羅里達白楊未成熟材純木材部

表 1 各試材之含水率及比重

樹 種		比重*		含水率	
		幹材	連皮幹材	幹材	連皮幹材
牛 奶 子	NB**	0.72	0.62	7.3	7.6
	NU	0.69	0.70	7.1	7.4
	WB	0.67	0.71	8.2	9.3
	WU	0.72	0.78	10.6	15.0
黑 赤 楊	NB	0.47	0.52	9.2	10.1
	NU	0.46	0.52	7.4	7.8
	WB	0.44	0.55	7.9	8.6
	WU	0.43	0.48	7.0	8.5
洋 槐	NB	0.52	0.62	12.8	12.6
	NU	0.61	0.69	9.5	8.4
	WB	0.54	0.53	10.8	10.4
	WU	0.46	0.55	10.2	9.5
佛羅里達 白 楊	NB	0.39	0.42	8.0	8.2
	NU	0.43	0.43	7.0	7.0
	WB	0.39	0.48	8.6	8.1
	WU	0.38	0.43	10.1	9.1
美國梧桐	NB	0.70	0.66	7.9	8.0
	NU	0.55	0.52	9.5	9.3
	WB	0.50	0.52	10.2	11.3
	WU	0.52	0.51	8.0	9.6

* 由乾體重與氣乾體積而得

** N = 窄距 (23 × 23cm) W = 寬距 (30.5 × 45.7cm)

B = 低地 U = 高地

之木質素含量分別是 21.0、21.6、23.4、24.9 及 25.8%。各樹種混合試材之木質素含量略高於純木材者; 分別為 22.3、22.7、30.0、29.1 及 26.2%。混合試材因包含了樹皮和木材, 故其木質素含量甚至高於成熟材之平均值。除木質素外, 樹皮尚含多醣類及單寧等酸性可溶物質, 在計量卡森氏木質素時, 常被併計於內。

從變異之結果觀之 (表 3), 立地和取材部位以及立地、栽植間距與取材部位間相互作用之差異不顯著。其他變因則有顯著差異。變異係數之範圍在 0.3~5.6% (參考表 2)。

表2 五種闊葉材之化學性質

樹種	取材部位	立地	栽培 種類	木質素 %	五碳糖 %	全纖維素 %	α -纖維素 %
洋槐	混合試材	B*	N**	28.4	19.2	67.2	35.4
			W	29.0	18.8	64.2	33.9
		U	N	31.1	18.4	68.3	34.8
			W	28.1	18.0	67.1	34.5
			N	24.6	19.4	75.1	36.4
	純木材	B	N	24.2	19.6	78.2	40.8
			W	25.5	20.3	75.8	38.9
		U	N	25.4	18.9	73.0	38.4
			W	28.8	17.8	62.1	30.2
			W	30.8	17.9	70.3	33.8
黑赤楊	混合試材	B	N	27.3	18.6	73.0	35.4
			W	33.3	18.2	59.7	29.1
		U	N	22.2	19.7	76.5	35.4
			W	25.3	20.6	75.2	35.2
			U	22.3	20.2	79.5	38.1
	純木材	B	N	23.9	20.0	74.6	35.9
			W	22.7	16.5	69.4	38.2
		U	N	22.1	15.8	71.0	38.8
			W	23.1	17.5	67.7	36.8
			W	21.3	16.2	72.0	40.1
佛羅里達白楊	混合試材	B	N	19.8	17.1	77.2	42.3
			W	22.0	17.6	76.8	42.0
		U	N	18.9	17.4	75.0	42.6
			W	23.4	17.3	78.0	41.8
	純木材	B	N	24.1	16.2	64.1	32.2
			W	26.3	15.7	71.3	35.1
		U	N	27.2	16.3	68.3	34.9
			W	27.3	16.1	65.8	30.3
			N	24.2	17.7	70.3	34.4
美國梧桐	混合試材	B	N	24.2	16.4	79.7	40.9
			W	25.7	18.8	76.6	39.9
		U	N	26.3	19.1	74.4	35.7
			W	22.4	20.0	69.7	32.1
			W	22.6	19.2	76.5	35.3
	純木材	B	N	23.2	19.6	79.1	36.6
			W	22.7	19.7	76.9	34.1
			N	19.4	20.1	76.9	33.6
			W	22.0	19.8	79.1	37.0
			U	22.3	20.0	76.7	34.5

* B = 低地 U = 高地

** N = 窄距 (23 × 23 cm) W = 寬距 (30.5 × 45.7 cm)

進行變方分析時，除立地與栽植間距以及立地、栽植間距與取材部位之交交互影響因子外，所有因素和其交互作用，對模式變化而言，皆為重要因素（表3）。其中，又以取材部位和栽植間距之變因最為重要。

表3 因數分析

依變數	自由度	木質素	五碳糖	全纖維素	α -纖維素
A (立地)	1	HS	HS	HS	N
B (間距)	1	HS	HS	HS	HS
A × B	1	HS	N	HS	HS
C (取材部位)	1	HS	HS	HS	HS
A × C	1	N	HS	HS	N
B × C	1	HS	HS	N	HS
A × B × C	1	N	S	HS	N
D (樹種)	4	HS	HS	HS	HS
A × D	4	HS	HS	HS	HS
B × D	4	HS	HS	HS	HS
A × B × D	4	HS	HS	HS	HS
C × D	4	HS	HS	HS	HS
A × C × D	4	HS	HS	HS	HS
B × C × D	4	HS	HS	HS	HS
A × B × C × D	4	HS	HS	HS	HS

HS = 1%水浸提差異 S = 5%水浸提差異

N = 5%水浸提差異不顯著

4. 全纖維素含量

成熟的北美闊葉樹材之全纖維素含量約佔75.0~82.5%⁽¹⁹⁾。牛奶子、佛羅里達白楊、黑赤楊、洋槐及美國梧桐等未成熟材木質部分之全纖維素含量，分別為75.2、75.5、76.4、76.7和77.4%（表2）。顯見未成熟材之全纖維素含量，與成熟闊葉樹材者相當。這五種未成熟闊葉樹材之混合試材，其全纖維素含量較純木材者低，分別為66.7、67.4、66.3、70.0和75.6%。混合試材因同時含有樹皮與木材，而樹皮含有較多的木質素，致使全纖維素含量較低。變異係數範圍在0.29~2.43%之間。

3. 五碳糖含量

五碳糖是木材半纖維素之基本成分，主由木糖和樹膠醛糖構成。成熟的北美闊葉樹材，約含21.4%之五碳糖⁽¹⁸⁾。表2顯示洋槐、佛羅里達白楊、黑赤楊、牛奶子及美國梧桐之五碳糖含量分別為17.4、18.0、19.5、20.0和20.2%。變異係數範圍在0.58~2.68%之間。

就取材部位之差異言，不含樹皮的全木質試材含 76.3% 之全纖維素，高於混合試材的 69.2%。樹種間之差異，惟美國梧桐有顯著差異，含有 76.5% 的全纖維素，異於其他四種。變異分析可知（表 3），栽植間距和取材部位相互之間，無顯著差異。

5. α -纖維素含量

成熟的北美闊葉樹材，通常含有 45~50% 之 α -纖維素⁽¹⁹⁾。五種未成熟材之木材部分，以美國梧桐的 α -纖維素含量最低，僅 34.8%；其中洋槐含量最多，42.2%。混有樹皮的試材， α -纖維素含量較少；其中黑赤楊含量最少，僅 32.1%；洋槐者最多，亦僅 38.5

%而已。可見未成熟材之 α -纖維素含量，比成熟闊葉樹材者少很多。

不同立地所得試材之 α -纖維素含量幾乎沒有差異，高地和低地者分別為 36.2 和 36.1%（表 3 和表 4）。樹種間之差異則相當顯著，黑赤楊、美國梧桐、佛羅里達白楊、牛奶子及洋槐分別含 34.1、34.7、35.0、36.6 和 40.3% 之 α -纖維素。變異係數範圍在 0.1~4.2% 之間。變方分析之結果顯示（表 3），立地因子，立地和取材部位交互因子，立地、栽植間距和取材部位交互因子，對 α -纖維素之含量，不具顯著影響。

表 4 立地、栽植間距及取材部位之鄧肯氏多變異分析

	立地		栽植間距		取材部位	
木質素含量	A2	A1	B2	B1	C1	C2
五碳糖含量	A2	A1	B1	B2	C2	C1
全纖維素含量	A2	A1	B2	B1	C2	C1
α -纖維素含量	A2	A1*	B2	B1	C2	C1

顯著水準 = 0.05 自由度 = 195 *A1 及 A2 差異不顯著
 樹種平均數由左至右最高至最低
 A1=低地 A2=高地 B1=窄距 B2=寬距 C1=混合試材 C2=木質試材

表 5 樹種化學成分鄧肯氏多變異分析

木質素含量	D1	D2	D4	D5	D3
聚戊糖含量	D5	D1	D2	D4	D3
全纖維素含量	D5	D3	D2	D4	D1
α -纖維素含量	D3	D1	D4	D5	D2

顯著水準 = 0.05 自由度 = 195
 (邊緣部分為數值差異不顯著，樹種平均數由左至右減少)
 D1=牛奶子 D2=黑赤楊 D3=洋槐 D4=佛羅里達白楊 D5=美國梧桐

肆、結論

1. 所有獨立變數含栽植立地、植株間距、木材取材部位及樹種等，對五種三年生未成熟闊葉樹材之化學性質，均具顯著影響。
2. 就立地因子考量，除 α -纖維素含量外，所有依變數之平均值呈顯著變異。樹木生長於高立地者，其木質素、五碳糖及全纖維素含量均顯著較高。
3. 窄距栽植者五碳糖含量較高；寬距林木則木質素、全纖維素及 α -纖維素含量較高。
4. 混合試材含有較高含量木質素；純木材部分，則以聚戊糖、全纖維素和 α -纖維素較高。

- 5.就樹種而言，牛奶子之木質素含量最高。美國梧桐之五碳醣和全纖維素含量最多。洋槐則有最多的 α -纖維素。
 - 6.試材分析後，木質素及全纖維素之總含量頗合理。然全纖維素內的 α -纖維素、五碳醣含量加總後，卻有10%以上之全纖維素下落不明。此一差異可能來自於未成熟材所含的六碳醣、葡萄糖酸和果膠等物質。有必要進一步探討這些物質之特性。
 - 7.在美國伊利諾州中、南部採用集約管理方法之五種闊葉樹未成熟材，皆可用以製造纖維和化學藥劑。無論作為能源燃料或化學工業原料，概以洋槐最佳。
- * 本文改寫自 Chow, et. al. 1995.⁽¹⁾ Chemical Compositions of Five 3-year-old Hardwood Trees. Wood and Fiber Science 27⁽³⁾ : 319-326.

伍、參考文獻

1. Chow, P., Rolfe, G. L. and Motter, W. K. 1995. Chemical Compositions of Five 3-year-old hardwood trees. Wood and Fiber Science 27 (3) : 319-326.
2. Goldstein, I. S. 1981. Organic chemicals from biomass. CRG Press, Boca Raton, FL. 310 pp.
3. Blankenhorn, P. R., T. W. Bowersox, C. H. Strauss, K. R. Kessler, L. R. Stover, and M. L. Dicola. 1992. Chemical composition of second rotation populus hybrids. NE-388, Wood Fiber Sci. 24 (3) : 280-286.
4. Rowell, R. M., ed. 1992. Opportunities for lignocellulosic materials and composites. In Emerging technologies for materials and chemicals from biomass. ACS Symposium Series 476 : 12-27. American Chemical Society, Washington, DC.
5. Narayana, R. 1992. Biomass resources for materials, chemicals, and fuels. ACS Symposium Series 476 : 1-10. American Chemical Society, Washington, DC.
6. Chum, H. L. and H. J. Power. 1992. Opportunities for the cost-effective production of bio-based materials. In Emerging technologies for materials and chemicals from biomass ACS Symposium Series 476 : 28-41. American Chemical Society, Washington, DC.
7. Strauss, C. H., P. R. Blankenhorn, T. W. Bowersox, and S. C. Grado. 1988. A cost analysis of alternate biomass supply system. Forest Prod. J. 38 (1) : 47-51.
8. Goldstein, I. S. 1992. Chemicals and fuels from biomass. In Emerging technologies for materials and chemicals from biomass. ACS Symposium Series 476 : 332-338. American Chemical Society, Washington, DC.
9. Chow, P., G. L. Rolfe, T. A. White, and C. S. Lee. 1980. Energy values of juvenile sycamore trees. Illinois Res. 22 (4) : 12-13.
10. Chow, P., G. L. Rolfe, and W. K. Motter. 1987. Site, spacing, free portion, and species influence ash and extractives content of five juvenile hardwoods Pages 247-253 in Proceedings, 6th Central Hardwood Forest Conference.
11. Chow, P., and E. B. Lucas. 1988. Fuel characteristics of selected four-year-old trees in Nigeria. Wood Fiber 20 (4) : 431-437.
12. Chow, P., and G. L. Rolfe. 1989. Carbon and hydrogen content of short-rotation biomass of five hardwood species. Wood Fiber 21 (1) : 30-36.
13. Lee, C. S. 1981. The chemical and physical properties of two-year short-rotation deciduous species. Master's thesis, University of Illinois, Urbana, IL.
14. Sas for Linear Models. 1992. A guide to the ANOVA and GLM procedures. Version 6, 4th ed. SAS Institute, Cary, NC.
15. American Society for Testing and Materials. 1982. Wood and adhesives. Part 22. ASTM, Philadelphia, PA.
16. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 1992. Tappi Test Methods. Tappi Press, Atlanta, GA.
17. Brown, H. P., A. J. Panshin and C. C. Forsath. 1952. Textbook of wood technology, vol. 2. McGraw Hill Book Co., New York, NY.
18. Wise, L. E., and E. C. Jahn. 1952. Wood Chemistry. Reinhold, New York, NY. 1264 pp.
19. Timell, T. E. 1957. Carbohydrate composition of ten North American species of wood. Tappi 40 (30) : 568.